



Kulstofbinding ved skovrejsning

Sagsnotat

Johannsen, Vivian Kvist; Nord-Larsen, Thomas; Vesterdal, Lars; Bentsen, Niclas Scott

Publication date:
2019

Document version
Også kaldet Forlagets PDF

Document license:
[Ikke-specificeret](#)

Citation for published version (APA):
Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., & Bentsen, N. S., (2019). *Kulstofbinding ved skovrejsning: Sagsnotat*, 26 s.

Miljø- og Fødevareministeriet
Att. Kresten Petersen krpet@mfvm.dk



SAGSNOTAT

24. JULI 2019

Vedr. Kulstofbinding ved skovrejsning

SKOV, NATUR OG BIOMASSE

Sagsbehandler Vivian Kvist Johannsen, Thomas Nord-Larsen, Lars Vesterdal, Niclas Scott Bentsen

ROLIGHEDSVEJ 23

1958 FREDERIKSBERG C

Kvalitetssikring Inge Stupak, Ingeborg Callesen, Karsten Raulund-Rasmussen og Lars Graudal – KU-IGN

DIR 35331699

MOB 20300969

Steen Gyldenkerne, AU-DCE

Jette Bredahl, KU-IFRO

vkj@ign.ku.dk

REF: VKJ

Indhold

Resume.....	2
Notat: Kulstofbinding ved skovrejsning - Beskrivelser af beregningerne og muligheder for udbygning.....	6
Baggrund.....	6
Formål.....	6
Data og Metode.....	7
Resultater.....	17
Diskussion.....	20
Konklusion.....	21
Referencer.....	22

Resume

SIDE 2 AF 26

Baggrund

Skovrejsning og forvaltning af eksisterende skov bidrager til klimamålsætningerne gennem træernes optag af CO₂ fra atmosfæren og lagring i skovøkosystemet og i træprodukter samt ved, at det producerede træ erstatter fossiltunge råmaterialer og fossile brændsler. Skovrejsning er derfor et anerkendt og vigtigt virkemiddel til at opnå målsætningerne i forhold til at imødegå klimaændringer.

For at kunne træffe beslutninger om hvilke virkemidler, der omkostningseffektivt vil kunne anvendes til at opfylde klimamålsætningerne, er det nødvendigt at få belyst, hvor meget CO₂, der kan bindes ved skovrejsning inden for en given tidsramme, og hvordan ændret forvaltning af skov kan påvirke, mængden af CO₂ der bindes.

Kulstofbindingen afhænger først og fremmest af produktiviteten. Produktiviteten afhænger af lokale vækstvilkår som jordbundens frugtbarhed, nedbør og temperatur. Produktiviteten afhænger også af den gennemførte skovdyrkning i forbindelse med etablering og i forvaltning af skov. Her spiller træartsvalget en meget stor rolle.

Formål

Målet med dette notat er at tilvejebringe opdaterede og transparent kvantificerede estimater for kulstofbindingen ved skovrejsning under forskellige scenarier. Dette omfatter, udover effekten af at opbygge kulstoflager i skov også kulstoflageret i træprodukter samt effekten ved substitution af fossiltunge materialer og fossile brændsler med træ. Målet er endvidere at identificere og kvantificere årsagerne til variationen i estimaterne fra de forskellige scenarier samt at identificere områder med manglende viden.

Forskellige opgørelser har tidligere set på forskellige dele af kulstofbindingen over tid. Nærværende notat forsøger at samle information om en hel bevoksnings udviklingsforløb og dækker dermed perioden fra opbygning af ny skov indtil forventet afdrift og gentilplantning i næste generation (100 års perspektiv).

Der opstilles beregninger inden for tre hovedscenarier af skovrejsning:

1. Klassisk skovrejsning på landbrugsjord, jf. tilskudsordningen til privat skovrejsning.
2. Skovrejsning med hurtigt voksende træarter og hjælpetræer.
3. Naturlig tilgroning hvor dyrkning af landbrugsjord opgives og overlades til naturlig tilgroning uden efterfølgende skovdrift.

Som reference for kulstofbinding i skovarealer, medtages en række opgørelser for udvikling for skovrejsning siden 1990, for skovarealet som helhed og for udlæg af eksisterende skovarealer uden aktiv høst af træ. Der inddrages ligeledes reference til ”Danish National Forest Accounting Plan 2021-2030”, der angiver udvikling i skovarealet frem til 2050 under EU’s regler.

Resultater

Kulstofbindingen varierer meget over tid ved etablering af skov (fra 1 til 42 t CO₂ eq /ha/år - Tabel 1). I de første 10 år efter skovrejsning bindes der blot ca. 2 t CO₂ eq /ha/år på de ringere jorder, når der plantes skov med eg eller andre langsomt voksende træarter og når arealerne overlades til naturlig tilgroning. På gode jorder kan der i de 10 første år bindes 11 t CO₂ eq /ha/år når der plantes hurtigt voksende løvtræer og 17 t CO₂ eq /ha/år når der plantes hurtigt voksende nåletræer. Set over en 100-årig periode varierer effekten ligeledes, om end mindre, fra under 5 til 21 t CO₂ eq /ha/år. Dertil kommer naturlig variation fra år til år betinget af vejr og samspil mellem træernes genetik og andre organismer som svampe, insekter og fauna, der på forskellig vis påvirker væksten af træer i nye skove.

En del af kulstofbindingen fra skoven kan som træprodukter lagre kulstof i lang tid i konstruktioner. Samtidig kan træprodukter anvendes til substitution af fossiltunge materialer (cement, stål, tegl eller mineraluld) og træ kan anvendes til energi. Både binding i træprodukter og substitutionseffekten vil afhænge udnyttelsen af det høstede træ og alternativerne til træ.

Et overblik over resultaterne er angivet i tabellen sidst i resuméet.

- A. Skovrejsning med løvtræer (I) medfører lavere kulstofbinding (3-11 t CO₂ eq/ha/år) de første 0-30 år end skovrejsning med nåletræarter og hurtigt voksende træarter (II) (13-31 CO₂ eq/ha/år).
- B. Skovrejsning på næringsrige, lerholdige jorde (høj bonitet) har generelt en højere kulstofbinding end skovrejsning på magre jorde (lav bonitet).
- C. Typisk forekommer den største årlige kulstofbinding i alderen 20-40 år efter etablering af skov (I). Dog for kulturer med hurtigt voksende træarter (II) allerede efter 10-20 år.
- D. Naturlig tilgroning (III) har meget variabel tilvækst, men oftest med lavere kulstofbinding end de andre scenarier som følge af lavere tæthed og langsomt voksende træarter.
- E. Ved skovrejsning med hurtigt voksende hjælpetræarter og/eller nåletræer (II) sker der en hurtig kulstofbinding, og der fastholdes et højt niveau også over tid.

- F. En del (40-60 %) af det kulstof der bindes ved træernes vækst, høstes mens træerne vokser og resten findes i den del af træerne som kan høstes til sidst, hvorefter en ny generation af træer gror op. Høst af træ kan enten anvendes til materialer eller til substitution for fossile brændsler. En øget anvendelse til materialer vil give en større kulstofbinding.
- G. Der forventes en lille, men positiv langsigtet effekt på jordbundens indhold af kulstof og en positiv effekt på skovbundens indhold af dødt ved og litter.
- H. Effekten af ophør af dræning er ikke medtaget. Det vil føre til øget binding af CO₂, men kan også samtidig øge udledningen af metan og lattergas (jf. standardberegninger) og føre til mindre vækst i træerne på arealet.

Konklusion

Ved skovrejsning er der ikke ét tal for kulstofoptaget, der vil være gældende, men kulstofoptaget vil være påvirket af følgende hovedfaktorer:

- Hvor – jordbunden og lokale vækstvilkår (nedbør, temperatur).
- Hvordan – træart og forvaltning (plantning, tilgroning, hjælpetræer).
- Hvornår – alder af skovrejsningen påvirker kulstofoptaget i den aktuelle periode.

Ny skovrejsning, som den er gennemført siden 1990, vil have en gennemsnitlig kulstofbinding på 12 t CO₂ eq/ha/år, med en spændvidde på 4-21 t CO₂ eq/ha/år afhængig af hovedfaktorerne. Det samlede skovareal har en årlig kulstofbinding på 9 t CO₂ eq/ha/år. Både kulstoflageret i skoven og mulighed for substitutionseffekter gennem høst af træ påvirkes af skovforvaltning.

Oversigtstabel for kulstofoptag ved skovrejsning

SIDE 5 AF 26

Årligt optag af kulstof (t CO ₂ eq /ha/år) \ Alder	0-10	10-20	20-30	30-40	40-100	Gns.0-100
I: Løv, bøg, høj bonitet	3	6	22	22	17	16
I: Løv, bøg, lav bonitet	2	2	7	17	14	11
I: Løv, eg, høj bonitet	3	7	18	15	10	10
I: Løv, eg, lav bonitet	2	2	8	14	9	8
I: Blandet løv med indblanding af nål, høj bonitet	3	8	21	36	14	15
I: Blandet løv med indblanding af nål, lav bonitet	2	3	7	24	13	11
I: Løv, bøg med ekstra brede skovbryn, høj bonitet	3	6	18	19	14	13
I: Løv, bøg med ekstra brede skovbryn, lav bonitet	2	2	6	14	11	9
II: Hurtigt voksende kultur, poppel med bøg, høj bonitet	11	27	22	23	17	19
II: Hurtigt voksende kultur, poppel med eg, lav bonitet	8	24	6	14	9	11
II: Hurtigt voksende kultur, douglas/sitka/grandis/rødgran, høj bonitet	17	42	35	26	15	21
II: Hurtigvoksende kultur, sitka/rødgran, lav bonitet	8	27	7	20	13	14
III: Naturlig tilgroning, mange frøkilder	3	3	4	11	12	9
III: Naturlig tilgroning, få frøkilder	2	2	4	6	10	7
III: Naturlig tilgroning, Trædække under 50 % og max 5 m høj	3	3	4	4	1	2
Reference I – NFI skovrejsning siden 1990	5	7	19	19	12	12
Reference II – NFI naturlig tilgroning siden 1990	3	5	10	13	5	6
Reference III – Det danske skovareal – samlet ved konstant areal	9	9	9	9	9	9
Reference IV – Suserup skov, urørt skov	-9	15	-	-	-	1
Reference V – Ophør af drift af 150 år gammel bøgeskov	4	4	4	4	2	2

Notat: Kulstofbinding ved skovrejsning - Beskrivelser af beregningerne og muligheder for udbygning

SIDE 6 AF 26

Baggrund

Skovrejsning og forvaltning af eksisterende skov bidrager til klimamålsætningerne gennem træernes optag af CO₂ fra atmosfæren og lagring i skovøkosystemet og i træprodukter samt ved, at det producerede træ erstatter flere fossiltunge råmaterialer og fossile brændsler. Skovrejsning er derfor et anerkendt og vigtigt virkemiddel til at opnå målsætningerne i forhold til at imødegå klimaændringer.

For at kunne træffe beslutninger om hvilke virkemidler, der omkostningseffektivt vil kunne anvendes til at opfylde klimamålsætningerne, er det nødvendigt at få belyst, hvor meget CO₂, der kan bindes ved skovrejsning inden for en given tidsramme, og hvordan ændret forvaltning af skov kan påvirke, mængden af CO₂ der bindes.

Kulstofbindingen afhænger først og fremmest af produktiviteten. Produktiviteten afhænger af lokalitetens frugtbarhed, dvs. lokale vækstvilkår som jordbund, nedbør og temperatur. Produktiviteten afhænger også af den gennemførte skovdyrkning, i forbindelse med etablering og i forvaltning af skov. Her spiller træartsvalget en meget stor rolle.

Formål

Målet med dette notat er at tilvejebringe opdaterede og transparent kvantificerede estimater for kulstofbindingen ved skovrejsning under forskellige scenarier. Dette omfatter, udover effekten af at opbygge kulstoflager i skov også kulstoflageret i træprodukter samt effekten ved substitution af fossiltunge materialer og fossile brændsler med træ. Målet er endvidere at identificere og kvantificere årsagerne til variationen i estimaterne fra de forskellige scenarier samt at identificere områder med manglende viden.

Forskellige opgørelser har tidligere set på forskellige dele af kulstofbindingen over tid. Nærværende notat forsøger at samle information om en hel bevoksnings udviklingsforløb og dækker dermed perioden fra opbygning af ny skov indtil forventet afdrift og gentilplantning i næste generation.

Der opstilles beregninger inden for tre hovedscenarier af skovrejsning:

1. Klassisk skovrejsning på landbrugsjord, jf. tilskudsordningen til privat skovrejsning.
2. Skovrejsning med hurtigt voksende træarter og hjælpetræer.
3. Naturlig tilgroning, hvor dyrkning af landbrugsjord opgives og overlades til naturlig tilgroning uden efterfølgende skovdrift.

Som reference for kulstofbinding i skovarealer, medtages en række opgørelser for udvikling for skovrejsning siden 1990, for skovarealet som helhed og for udlæg af skovarealer uden aktiv høst af træ. Der inddrages ligeledes reference til ”Danish National Forest Accounting Plan 2021-2030” der angiver udvikling i skovarealet frem til 2050 under EU’s regler.

Data og Metode

Referenceopgørelser

En række opgørelser har tidligere arbejdet med kulstofbinding i danske skove.

I ”Danish National Forest Accounting Plan 2021-2030” (Johannsen et al. 2019) er der lavet opgørelser for skovrejsning siden 1990 såvel som for hele skovarealet, ligesom der er lavet særlige analyser for andre tiltag. Disse opgørelser er medtaget som reference for scenarierne.

Skovrejsning siden 1990

Vækst for skovrejsning siden 1990 er baseret på modellerne opstillet i Johannsen et al. (2019) og valideringen fremgår af rapportens Tabel 5. Den kombination af modeller, der kunne reproducere udviklingen i kulstofpuljerne i skovrejsningen viste sig at være en kombination af vækstmodeller (Vidar, Nord-Larsen et al. 2008) for bøg (bonitet 2) for 30 % af arealet, eg (bonitet 4) for 40 % af arealet og rødgran (bonitet 2) for 30 % af arealet, hvilket afspejler den kombination af jordbund og træarter der er i den etablerede skovrejsning siden 1990. Samtidig kunne det konstateres, at for det nye skovareal var der en bevoksningsprocent på 90 %.

Udviklingen over år (2021-2050) afspejler kombinationen af vækstmodellerne og hvor meget skovrejsning, der er etableret i hvert år siden 1990. Nedenstående Tabel 1 er baseret på Johannsen et al. (2019), hvor særligt aldersgruppen < 20 år er påvirket af den stadig tilførsel af nye arealer med lav tilvækst.

Tabel 1 Kulstofbinding i det samlede skovrejsningsareal siden 1990, baseret på Johannsen et al. 2019 (bemærk her angives optag som positive værdier. I Johannsen et al 2019 anvendes rapporterings notering, med optag som negative værdier).

Aldersklasse T CO ₂ eq/ha/år	2020-2025	2025-2030	2030-2035	2035-2040	2040-2045	2045-2050
pr ha alder <20	3,1	2,9	2,0	2,9	2,9	2,9
pr ha alder 20-30	13,6	13,7	15,1	14,1	9,6	14,0
pr ha alder >30	7,4	6,8	6,2	5,7	6,1	4,6

Hvis man tager 1 ha og tilplanter med 100 % bevoksningsprocent, med samme gennemsnitlige vækstmodel vil udviklingen være som angivet for *NFI skovrejsning siden 1990* (Tabel 2, Reference I).

At fastsætte kulstoflagringen for arealer med naturlig tilgroning er vanskeligt fordi variationen er stor og erfaringerne få. Schou et al. (2014) fandt at arealer med naturlig succession etableret gennem 20 år havde en gennemsnitlig bevoksningsprocent på 50 %, hvilket er afspejlet i *NFI naturlig tilgroning siden 1990* (Tabel 2, Reference II). Der er dog ikke viden om hvorledes det vil udvikle sig ud over alder 30 år, hvor der endnu ikke haves data. Det forventes at det stående kulstoflager på 100 år når samme niveau som den øvrige skovrejsning, men at der ikke er mulighed for høst af træ.

Samlet skovareal

Skovrejsning har en stor betydning for det danske skovareal, som er øget fra 193.000 ha i 1881 til mere end 625.000 ha i 2017. Alene siden 1990 er der etableret mere end 90.000 ha ny skov. Kulstofbindingen i det samlede skovareal er således stadig påvirket af processen med skovrejsning.

Væksten i de eksisterende danske skove inkl. midlertidigt ubevoksede arealer og hjælpearealer (i alt ca. 5 % af skovarealet) og på tværs af jordbundstyper og træarter er opgjort i Nord-Larsen et al. (2018). Den gennemsnitlige tilvækst er 9,2 m³/ha/år i den overjordiske levende biomasse, svarende til ca. 9 t CO₂ eq /ha/år, hvilket afspejler den aktuelle sammensætning af skovarealet med hensyn til jordbund, træarter og aldre af træerne og den skovrejsning, der er sket igennem mere end 100 år. Dette indgår som *Det danske skovareal* i (Tabel 2, Reference III).

Biodiversitetsskov, urørt skov og ophør af drift

Som et led i en øget indsats for biodiversitet i skov er det besluttet at udlægge en del af statsskovene til urørt skov og anden biodiversitetsskov. Kulstofbindingen ved udlæg af skov til urørt skov og anden biodiversitetsskov er behandlet Johannsen et al. (2019), hvortil der henvises, idet resumeet angives her. Arealet omfattet af Naturpakken vil ikke adskille sig grundlæggende fra andre skovarealer, der måtte blive udlagt med biodiversitet/urørt skov som prioriteret anvendelse.

Udlægning af skov til urørt skov og biodiversitet vil på sigt reducere det samlede areals optag af drivhusgasser til 0 t CO₂ eq /ha/år mod en fortsat forvaltnings optag på ca. 5-15 t CO₂ eq /ha/år (set over 200 års periode). I en omstillingsperiode, hvor der fældes i biodiversitetsskovene har omlægningen ingen eller kun en mindre effekt på det samlede optag. Efter omstillingsperioden vil udlægning af skov til biodiversitetsformål reducere arealets samlede nettooptag af CO₂ i forhold til, hvis de samme arealer blev drevet efter gennemsnitlig skovforvaltning. Reduktionen falder gradvist til ca. 10 % efter 100 år og til 1 % efter 200 år, hvorefter der forventes at være en nettoligevægt i skoven, og ingen udtag af træprodukter.

Der er gennemført omfattende analyser af kulstofpuljerne i *Suserup Skov* i perioden 1990-2010 (Nord-Larsen et al. 2019) og det medtages som reference IV sammen med en model for en *150 år gammel bøgeskov*, med en årlig tilvækst på 3 m³/ha/år dog faldende til 0 efter 100 år (baseret på data fra langsigtede forsøg som bl.a. ligger til grund for VIDAR – se også Nord-Larsen et al. 2008). Begge dele fremgår af Tabel 2 (Reference IV og V).

Tabel 2 Reference data for skov

Årligt optag af kulstof (t CO ₂ eq /ha/år) \ Alder	0-10	10-20	20-30	30-40	40-100	Gns.0-100
Reference I– NFI skovrejsning siden 1990	4	7	17	19	12	12
Reference II– NFI naturlig tilgroning siden 1990	3	4	10	6	2	4
Reference III– Det danske skovareal – samlet ved konstant areal	9	9	9	9	9	9
Reference IV– Suserup skov, urørt skov	-9	15	-	-	-	1
Reference V– Ophør af drift af 150 år gammel bøgeskov	4	4	4	4	3	3

Vækstmodeller

Beregningerne for ny skovrejsning er lavet med grundlag i vækstmodeller for danske skovtræarter (Nord-Larsen et al. 2008, Nord-Larsen et al. 2009). Disse modeller er implementeret i programmet VIDAR, som beregner udvikling i stående vedmasse samt i hugsten. Der er antaget en skovforvaltning med medium hugst svarende til den almindeligst praktiserede hugstform. For alle de træarter er der her lavet en beregning for en 100 årig periode. I praksis vil omdriftsalder (tid fra frø til høst af hovedparten af træerne) varierer afhængig af lokalitet, træart og markedsforhold for det høstede træ, men i denne analyse er det valgt at fastholde ens omdriftsalder på 100 år.

Der indgår følgende vækstmodeller i beregningerne – 0-100 år:

- Bøg, bonitet 2
- Bøg, bonitet 5
- Eg, bonitet 2
- Eg, bonitet 4
- Rødgran, bonitet 1
- Rødgran, bonitet 2
- Rødgran, bonitet 4
- Douglasgran, bonitet 1

For hver vækstmodel er der foretaget beregning af kulstofindhold i stående vedmasse i skoven og i den høstede vedmasse (faktorer til omregning fra volumen til kulstof følger metoderne fra Danmarks Skovstatistik – Nord-Larsen & Johannsen 2016).

Ved beregning af den fulde kulstofpulje er der indregnet en underjordisk biomasse i rødder på 20 % af den overjordiske biomasse, som et gennemsnit for alle træarterne. Yderligere specificerede beregninger kan udføres, men er i denne sammenhæng vurderet af mindre indflydelse (Nielsen et al. 2015, Nord-Larsen & Nielsen 2015, Nord-Larsen et al. 2017, Skovsgaard & Nord-Larsen 2012).

Som model for hurtigt voksende hjælpetræer er anvendt en vækstmodel for poppel med en omdriftstid på 20 år. Den blev ligeledes anvendt i Graudal et al. (2013) og er baseret på en kombination af (Bergstedt 1981 og Jansen et al. 1996). Modellerne er opstillet for gode og dårlige jorde som udgangspunkt (soiltype 1 – lave boniteter og soiltype 2 – høje boniteter). Senere analyser af poppel har bekræftet at den har et højt vækstopotentiale, men har ikke givet anledning til udvikling af nye vækstmodeller (Nielsen et al. 2014, Nielsen et al. 2015).

I forhold til de beregnede scenarier kan det nævnes at:

- Scenarier med ”Blandet løv med elementer af nål” har 70 % bøg og 30 % rødgran.
- Scenarier med ”Løv, bøg med ekstra brede skovbryn” har 80 % bøg og 20 % løvtræhegn
- Scenarier med ”Hurtigvoksende kultur, poppel med bøg” – har 100 % bøg og 100 % poppel, idet poppel antages at udnytte huller mellem bøgens plantepladser.
- Scenarier med ”Hurtigvoksende kultur, douglas/sitka/grandis/rødgran” – har 100 % douglasgran for høj bonitet og 100 % rødgran for lav bonitet samt 100 % poppel, idet den antages at udnytte hullerne mellem nåletræernes plantepladser.
- Alle scenarierne er lavet for arealer med 100 % bevoksningsprocent. I en del skovarealer vil der være 0-10 % huller og en tilsvarende reduktion af bevoksningsprocent.
- Der være brug for veje og hjælpearealer i et nyt skovareal. Det udgør 5 % i det samlede skovareal i dag (Nord-Larsen et al. 2018).

Der henvises også til regnearket for mere detaljerede formler og metoder til sammenstilling af data samt modeller.

Muligheder for udbygning:

Den realiserede kulstofbinding på et areal med skovrejsning påvirkes af mange faktorer, særligt vækst og overlevelse af træerne de første år. Modellerne har ikke mulighed for at angive estimer for variationen som følge af dette.

Særligt er væksten i perioden 0-20 år kun sjældent målt i forsøgsopgørelser, hvorfor udviklingen i den periode er mere usikkert bestemt. Måltrettede

opgørelser og analyser vil kunne supplere viden om skovudviklingen inden for denne tidsramme, der er vigtig i forhold til den tidlige udvikling af ny skov.

SIDE 11 AF 26

Naturlig tilgroning og ekstra brede løvhegn

I en række sammenhænge og på nogle lokaliteter er naturlig tilgroning ønsket. Der er generelt stor variation i foryngelsens etablering og vækst ved etablering af skov med naturlig succession (Aude et al. 2002, Bárcena et al. 2014, Bentsen & Sørensen 2004, Brunner 2000a, 200b, 2001, Brunner & Klitgaard 2000, Gundersen et al. 1999, Schou et al. 2013, Pedersen et al. 2001, Pedersen 2019).

Faktorer, der har stor betydning for kulstofbindingen ved naturlig tilgroning, er jordbund, tilstedeværelse og afstand til eksisterende frøkilder eller stødskud (fra gamle læhegn), konkurrence fra anden vegetation, klima (generelt og årlige variationer), fysisk påvirkning af arealet og evt. græsning af tamme eller vilde dyr.

Beregningerne for naturlig tilgroning er baseret på en række studier, der dog ikke er så omfattende og afspejler en stor variation i udviklingen af arealer med naturlig tilgroning. I mange tilfælde er der observeret en tilgroning på 10-20 % af arealet i løbet af de første 20 år på åbne arealer (Pedersen 2019) mens arealer der tidligere har været dækket af skov (Koning & Hart 2018) eller i tilknytning til skov (Pedersen 2019, Aude et al. 2002) kan have højere grad af tilgroning (40-60 %) efter 20 år.

I scenarierne er der opstillet en hurtig og en langsom tilgroning, for at afspejle en forventet variation i dækningen. Der er ikke mange data for den langsigtede udvikling, men det forventes at bevoksningernes struktur vil nærme sig det gennemsnitlige skovareal (som referencen for skovrejsning fra NFI) med 100 % for den hurtige tilgroning og 90 % for den langsommere tilgroning.

Muligheder for hugstудtag af træ er ikke kendt, men antages tilstede, særligt når tilgroningen opnår en vis tæthed og vedmasseopbygning. I beregningerne for 100 år er der antaget 50 % høst ift. NFI referencen i den hurtige tilgroning (i alt 312 t CO₂ eq/ha) og 25 % høst ift. NFI referencen i den langsomme tilgroning (i alt 156 t CO₂ eq/ha). Modeller fremgår af Tabel 3.

Etablering af tilgroning under påvirkning af græsning forventes at have en lavere bevoksningsprocent (< 50%) og ingen høst. Vedmasse niveauer er angivet i Tabel 3, der afspejler en lav produktivitet.

Løvtræhegn med fokus på diversitet og læ, antages at have lavere vækst og tæthed, samt ikke at være tilgængelige for høst (Westergaard et al. 2001, Olrik et al. 2002). Antagelser om vedmasseniveauer er angivet i Tabel 3.

SIDE 12 AF 26

Tabel 3 Overslag over kulstoflager for naturlig tilgroning og løvhegn.

Kulstoflager	Enhed \ Alder	0	10	20	30	40	100
III: Naturlig tilgroning, mange frøkilder	t CO ₂ eq/ha		15	22	30	64	479
III: Naturlig tilgroning, få frøkilder	t CO ₂ eq/ha	0	7	15	22	30	431
III: Naturlig tilgroning, Trædække under 50 %, græsning, ingen høst	t CO ₂ eq/ha	0	11	22	33	44	83
Løvhegn, høj bonitet	m ³ /ha	0	15	30	45	60	75
	t CO ₂ eq/ha	0	17	33	50	66	83
Løvhegn, lav bonitet	m ³ /ha	0	10	20	30	40	65
	t CO ₂ eq/ha	0	11	22	33	44	72

Muligheder for udbygning:

Der er behov for mere viden om faktorer, der har betydning for variationen i kulstoflagring efter naturlig tilgroning, udviklingen over tid, og hvorvidt disse arealer skal/kan udnyttes til høst af træ.

Dødt ved og litterlag

Ved etablering af ny skov opbygges der gradvist en pulje af dødt ved og andet uomsat organisk materiale (litter) i skoven. I Danmarks Skovstatistik (Nord-Larsen & Johannsen 2016) foretages direkte målinger af tykkelse af litterlaget for at estimere disse puljer. Disse data er anvendt som grundlag for hhv. nye skovarealer og for den eksisterende skov. Nøgletal er angivet i Tabel 4 nedenfor. Omsætningen/udledning af kulstof fra dødt ved og litterlaget medtages ikke i direkte i opgørelserne, men udelukkende ændringer i total mængderne, som det også gøres i rapportering af kulstof for skov.

Opbygningen af dødt ved i skove med fravær af høst er indarbejdet i scenarier for biodiversitetsskov og ophør af forvaltning baseret på forsøgsdata (Johannsen et al. 2015).

Tabel 4 Data for puljer for dødt ved og litterlag i skov, baseret på Danmarks Skovstatistik for hhv. skovrejsning efter 1990 (20-30 år) og for skov fra før 1990 (40-100 år). Øvrige værdier ansat ved gennemsnit, idet værdier er sat til 0 ved etablering.

SIDE 13 AF 26

Lager – stock	0-10	10-20	20-30	30-40	40-100
Dødt ved t CO ₂ eq/ha	0	0,3	0,5	2,5	4,4
Litterlag t CO ₂ eq/ha	0	8,5	17,0	33,3	49,6

Muligheder for udbygning:

Der er behov for bedre data og modeller for litterlagets og det døde veds kulstoflagring efter skovrejsning på landsplan, især på længere sigt (50+ år). Der findes meget detaljeret viden fra case studier, herunder Vestskoven ved København (Vesterdal et al. 2002, Barcena et al. 2014a).

Datagrundlaget for at kvantificere opbygningen af kulstoflager i dødt ved og litterlag ved naturlig tilgroning er sparsomt, og det giver ikke grundlag for særlige opgørelser af dødt ved og litterlag for de forskellige scenarier af tilgroning. De angivne estimater afspejler hovedsagligt aktivt forvaltet skov. Schou et al. (2013) opgjorde at 17 % af skovrejsningen siden 1990 var kommet som følge af naturlig tilgroning, bl.a. på arealer med hede og mose (Thorup Lottrup 2019).

Jordbund

Effekten af gradvist øget kulstofpulje i jorden ved skovrejsning er medtaget i beregningerne, jf. standardsatser på 0,21 t C/ha/år over 100 år (se Johannsen et al. (2019), afsnit 5.2.2 – svarende til 0,77 t CO₂ eq /ha/år). Dette er opgjort på tværs af forskellige jordbundstyper og afspejler sammensætning af såvel landbrugsarealet som skovarealet og forskellen mellem disse. Nærmere analyser af opgørelser og udvikling i kulstofpuljer i skovjorde kan findes i Barcena et al. (2014a, 2014b), Callesen et al. (2015), Rahman et al. (2017) og Nilsson & Aller (2019).

Ændret hydrologi, såvel dræning som ophør af dræning, vil have effekt på optag/udledninger fra jorden (se også afsnit 5.2.2 i NFAP og nedenstående Tabel 3). En øget fugtighed forventes at øge bindingen af kulstof i jord. Dog forventes mængden af kulstof i vegetationen at blive mindre, ligesom udledning af metan og lattergas forventes at stige. Eventuelle effekter af ændret hydrologi er ikke indregnet i scenarierne for skovrejsning.

Typisk vil skovarealer på tidligere mosearealer have et højere indhold af kulstof som udgangspunkt også før etablering af skov, hvilket også afspejles i disse arealer.

Ved ændring af arealanvendelse vil dynamik i jordbunden blive påvirket, særligt hvor etablering af skov medfører ophør af jordbearbejdning i forbindelse med årlige afgrøder.

SIDE 14 AF 26

Tabel 5 Kulstofudledning fra drænede og drænede genfugtede jorde. (se også afsnit 5.2.2 i NFAP).

	Udledning	Enhed	t CO ₂ eq/ha/år
CO ₂ udledninger fra drænede organiske jorde	2,6	t CO ₂ /ha/år	2,6
N ₂ O udledninger fra drænede organiske jorde (GWP – Global Warming Potential 298)	4.4	kg N ₂ O /ha/år	1,3
CH ₄ udledninger fra drænede og genfugtede organiske jorde (varierende emissioner) (GWP – Global Warming Potential 25)	2,5 - 237	kg CH ₄ -C/ha/år	0,06 – 5,9

Muligheder for udbygning:

I det omfang, at særlige jorde (lavbundsjorde) skal inddrages i skovrejsning, kan der foretages direkte opgørelser i forhold til de berørte arealer og disses hydrologiske forhold samt forekomst af organiske jorde (med højt kulstofindhold). Der er meget lidt konkret viden om drivhusgasdynamik for udtagne lavbundsjorde, også efter skovrejsning eller naturlig tilgroning.

Høstet træ

Kulstofpuljen i høsten er opgjort som for den levende, overjordiske biomasse, uanset anvendelsen efterfølgende (træprodukter eller energi). I det følgende beskrives nogle elementer ift. kulstoflagring og reduceret CO₂ udledning (substitutionseffekt) for det høstede træ.

I opgørelserne af høstet træ fra skove er der to hovedpuljer der arbejdes med, hvor træ til træprodukter (dvs. skårne produkter, træplader og papir) indgår i en særlig pulje – Harvested Wood Products (HWP). Hvert år indgår ny høst i puljen og den samlede pulje antages at blive reduceret gradvist afhængig af levetiden for de forskellige produkter. I flg. standarden for beregningerne antages skårne produkter at blive halveret på 35 år, træplader på 25 år og papir på 2 år. I rapporteringen (som angivet i Johannsen et al. 2019) opgøres kulstofpuljen i denne gruppe, og der inddrages udvikling over tid.

En del af det høstede træ går direkte fra skoven til forskellige former for energiproduktion. I hugststatistikken (Nord-Larsen et al. 2019) fremgår det at 60 % af hugsten i de danske skove går direkte til energitræ (typisk flis) og brænde. I opgørelserne af de danske udledninger fra energiproduktion, medtages ikke udledninger fra forbrænding af biomasse, da kulstofpuljen i denne biomasse er fraregnet det lager der opgøres i skoven.

Træprodukters (HWP) substitution

SIDE 15 AF 26

Der er lavet en del undersøgelser af de samlede kulstofbalancer af træprodukter, når også fortrængning tages i betragtning. En hyppig anvendt kilde er Sathre & O'Connor (2010), som viser at 1 ton kulstof i træprodukter (ikke træ til energi) fortrænger 1-3 ton fossilt kulstof med en medianværdi på 2,1. Der er forskellige opgørelser af træprodukters substitutionseffekt og alternative bud kan findes i disse kilder (De Rosa et al. 2018, Geng et al. 2017, Smyth et al. 2017, Bentsen et al. 2019).

Træ til energi - substitution

Madsen & Bentsen (2018) viser, at for en reelt gennemført konvertering fra kul til træ for et kraftvarmeværk, er den umiddelbare udledning ved afbrænding af biomasse lidt højere (+3,2%) end for kul, altså en fortrængningseffekt på 0.97. Men når kulstofgæld og naturlig forrådnelse af biomassen blev taget med i betragtning, var gælden alligevel tilbagebetalt inden for det første år efter konverteringen.

Den støkiometriske CO₂ udledning per energienhed fra træ er næsten den samme eller lidt over kul, så hvis konverteringen fra kul til træ ikke nedsætter værkets effektivitet vil udledningen være den samme.

Ovenstående betragtninger er i de fleste tilfælde baseret på en antagelse om at biomasse fortrænger kul. Man kan imidlertid ikke antage, at biomasse til energi fortrænger en bestemt energiressource, hverken kul eller vindenergi. I hvert enkelt tilfælde må man analysere den sammenhæng biomassen kommer til at indgå i, hvor træet kommer fra og hvad der ville være sket med træet hvis det ikke blev brugt til energi. Der er en udbredt mangel på empiri ift. spørgsmålet om, hvad der erstattes. Reelt må man aktuelt forvente, at alternativet til biomasse er et mix af kul, naturgas, vandkraft (importeret el), vind og sol. Jo længere vi kigger ud i fremtiden, des mere 'grønt' bliver det sandsynlige alternativ til biomasse.

Samlet høst og substitution

Et samlet overslag over kulstofeffekten af høstet træ kan beregnes som følger:

Aktuelt er det ca. 60% af hugsten fra Danmarks skove, der går direkte til energi. Dermed er der ca. 40% af hugsten der går til træprodukter, der med et skæredudbytte på 47-48% resulterer i at ca. 20% af hugsten, der ender direkte i træprodukter (HWP).

Hvis der antages en substitutionseffekt på 2 for træprodukter (20%) og resten (60+20%) i energi med en gennemsnitlig substitutionseffekt på 0.5 (et mix af energityper) – vil en samlet substitution være $0,2*2+0,8*0,5=0,8$.

Hvis høsten til energi udelukkende erstatter kul, vil effekten være $0,2 \cdot 2 + 0,8 \cdot 0,97 = 1,2$.

SIDE 16 AF 26

Substitutionseffekten er MEGET afhængig af, hvor stor en del af træet, der udnyttes til varige produkter (på savværker), hvilke produkter det erstatter (hvor kulstofintensive de er – som beton og stål) og hvilke energikilder det erstatter. I beregningerne er der anvendt en substitutionseffekt på 1,0 hvilket er en forenkling ift. De store usikkerheder der er ift. Opgørelserne.

Substitutionseffekterne vil ændre sig over tid, idet alternativerne som træ substituerer vil ændre sig over tid, særligt over 100 år. Fx vil der komme mere vedvarende energi og der kan generelt ske udvikling af teknologi vedr. såvel energiforsyning og byggeri. Hvordan de vil påvirke den samlede substitutionseffekt er vanskelig at opgøre. Forenklingerne vedr. substitutionseffekt er gjort, for at holde analysen inden for de givne ressourcemæssige tidsrammer.

Muligheder for udbygning:

Der kunne inddrages analyser af effekten af substitution, herunder effekten af brug af træ til byggeri og energi. Dette ville have været for omfattende at inddrage i den aktuelle analyse, da substitution af stål, beton, kul og gas afhænger af en række forhold som pris, mængder og markedskræfter. Særlig vigtigt for effekterne er hvorledes det nationale og globale marked er reguleret og hvorledes prisudviklinger påvirker de forskellige aktørers brug af træ (virksomheder, energisektor, borgere, arkitekter, designere m.fl.).

Det vil være vigtigt at følge den faktiske udvikling i høsten i skove såvel som omstillingen i samfundet i øvrigt. Det vil påvirke substitutionseffekterne for materialer og energi, på kort og lang bane.

Det vil være vigtigt at få kortlagt de samlede træstrømme i Danmark, inkl. import og eksport af træ og træbaserede produkter.

Tidsperspektiv

Fælles for beregningerne for skovrejsning antages, at arealerne bliver omfattet af fredskovspligt i den forstand, at der sikres vedvarende skovdække på arealerne jf. Skovloven, men at der ikke er øvrige begrænsninger i skovforvaltningen. Arealerne forventes dermed efterfølgende bevokset med træer og vil have en gennemsnitlig kulstofbinding som i den indledende periode. Kulstoflageret i det nye skovareal vil stabilisere sig, og kulstofbinding vil kunne hentes ud som træprodukter eller træ til energi, eller frigives gennem den almindelige dynamik i skoven. Beregningerne i dette notat kigger 100 år frem. Derefter forventes den nye skovrejsning at indgå som del af det samlede skovareal, jf. reference opgørelsen nævnt nedenfor.

Resultater

SIDE 17 AF 26

Kulstofbindingen varierer meget over tid ved etablering af skov (fra 1 til 42 t CO₂ eq /ha/år - Tabel 1). I de første 10 år efter skovrejsning bindes der blot ca. 2 t CO₂ eq /ha/år på de ringere jorder, når der etableres skov med plantning af eg eller andre langsomt voksende træarter samt ved naturlig tilgroning. På gode jorder kan der i de 10 første år bindes 11 t CO₂ eq /ha/år ved skovrejsning med hurtigt voksende løvtræer og 17 t CO₂ eq /ha/år med hurtigt voksende nåletræer. Set over en 100-årig periode varierer effekten ligeledes, om end mindre, fra under 5 til 21 t CO₂ eq /ha/år. Dertil kommer naturlig variation fra år til år betinget af vejr og samspil mellem træernes genetik og andre organismer som svampe, insekter og fauna, der på forskellig vis påvirker væksten af træer i nye skove.

En del af kulstofbindingen fra skoven kan som træprodukter lagre kulstof i lang tid i konstruktioner. Samtidig kan træprodukter anvendes til substitution af fossiltunge materialer (produktion af cement, stål, tegl og mineraluld) og træ kan anvendes til energi. Både binding i træprodukter og substitutionseffekten vil afhænge udnyttelsen af det høstede træ og alternativerne til træ.

Et overblik over resultaterne er angivet i Tabel 6.

- A. Skovrejsning med løvtræer (I) medfører lavere kulstofbinding (3-11 t CO₂ eq/ha/år) de første 0-30 år end skovrejsning med nåletræarter og hurtigt voksende træarter (II) (13-31 CO₂ eq/ha/år).
- B. Skovrejsning på næringsrige, lerholdige jorde (høj bonitet) har generelt en højere kulstofbinding end skovrejsning på magre jorde (lav bonitet).
- C. Typisk forekommer den største årlige kulstofbinding i alderen 20-40 år efter etablering af skov (I), dog for kulturer med hurtigt voksende træarter (II) allerede efter 10-20 år.
- D. Naturlig tilgroning (III) er meget variabel tilvækst, men oftest med lavere kulstofbinding end de andre scenarier som følge af lavere tæthed og langsomt voksende træarter.
- E. Ved skovrejsning med hurtigt voksende hjælpetræarter og/eller nåletræer (II) sker der en hurtig kulstofbinding, og der fastholdes et højt niveau også over tid (beregningerne her sætter alle træarter til en 100 års rotation. Ofte vil hurtigt voksende træarter have en lavere rotation, hvilket vil øge gennemsnitlig kulstofbinding).
- F. En del (40-60 %) af det kulstof der bindes ved træernes vækst, høstes mens træerne vokser og resten findes i hovedbevoksningen som kan høstes til sidst, hvorefter en ny generation af træer gror op. Høst af træ kan enten anvendes til materialer eller til substitution for fossile brændsler. En øget anvendelse til materialer vil give en større kulstofbinding.

G. Der forventes en lille, men positiv effekt på jordbundens indhold af kulstof og en positiv effekt på skovbundens indhold af dødt ved og litter.

SIDE 18 AF 26

H. Effekten af ophør af dræning er ikke medtaget. Det vil føre til øget binding af CO₂, men kan også samtidig øge udledningen af metan og lattergas (jf. standardberegninger) og føre til mindre vækst i træerne på arealet.

Tabel 6 Oversigtstabel for kulstofoptag ved skovrejsning

Årlig optag af kulstof (t CO ₂ eq /ha/år) \ Alder	0-10	10-20	20-30	30-40	40-100	Gns.0-100
I: Løv, bøg, høj bonitet	3	6	22	22	17	16
I: Løv, bøg, lav bonitet	2	2	7	17	14	11
I: Løv, eg, høj bonitet	3	7	18	15	10	10
I: Løv, eg, lav bonitet	2	2	8	14	9	8
I: Blandet løv med indblanding af nål, høj bonitet	3	8	21	36	14	15
I: Blandet løv med indblanding af nål, lav bonitet	2	3	7	24	13	11
I: Løv, bøg med ekstra brede skovbryn, høj bonitet	3	6	18	19	14	13
I: Løv, bøg med ekstra brede skovbryn, lav bonitet	2	2	6	14	11	9
II: Hurtigvoksende kultur, poppel med bøg, høj bonitet	11	27	22	23	17	19
II: Hurtigvoksende kultur, poppel med eg, lav bonitet	8	24	6	14	9	11
II: Hurtigvoksende kultur, douglas/sitka/grandis/rødgran, høj bonitet	17	42	35	26	15	21
II: Hurtigvoksende kultur, sitka/rødgran, lav bonitet	8	27	7	20	13	14
III: Naturlig tilgroning, mange frøkilder	3	3	4	11	12	9
III: Naturlig tilgroning, få frøkilder	2	2	4	6	10	7
III: Naturlig tilgroning, Trædække under 50 % og max 5 m høj	3	3	4	4	1	2
Reference I – NFI skovrejsning siden 1990	5	7	19	19	12	12
Reference II – NFI naturlig tilgroning siden 1990	3	5	10	13	5	6
Reference III – Det danske skovareal – samlet ved konstant areal	9	9	9	9	9	9
Reference IV – Suserup skov, urørt skov	-9	15	-	-	-	1
Reference V – Ophør af drift af 150 år gammel bøgeskov	4	4	4	4	2	2

I Tabel 7 er kulstofbindingen opdelt efter den pulje der forventes at stå i skoven (lageret) og den del der forventes høstet i løbet af de 100 år. Ved foryngelse af skov, høstes lageret for at give plads til en ny generation træer. Dette gøres enten på et tidspunkt eller over en periode (gradvis foryngelse). Ud over den variation der er afspejlet i scenarierne i Tabel 7, kan yderligere valg af forvaltning påvirke kulstofbindingen, hvilket blev gennemgået af Graudal et al. (2013 og 2013b).

Tabel 7 Supplerende data.

SIDE 19 AF 26

Scenarie	0-10	10-20	20-30	30-40	40-100	gns 0-100
I: Løv, bøg, høj bonitet, Kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	28	90	306	425	792	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	6	22	12	6	8
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	11	11	8
I: Løv, bøg, lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	17	37	104	270	657	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	2	2	7	17	6	7
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	8	5
I: Løv, eg, høj bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	30	101	285	384	634	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	7	18	10	4	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	5	5	4
I: Løv, eg, lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	18	41	118	260	567	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	2	2	8	14	5	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	4	2
I: Blandet løv med indblanding af nål, høj bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	33	116	322	452	753	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	8	21	13	5	8
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	23	9	8
I: Blandet løv med indblanding af nål, lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	19	47	118	278	648	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	2	3	7	16	6	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	8	7	5
I: Løv, bøg med ekstra brede skovbryn, høj bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	29	85	267	370	676	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	6	18	10	5	7
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	9	9	6
I: Løv, bøg med ekstra brede skovbryn, lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	19	41	102	242	566	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	2	2	6	14	5	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	6	4
II: Hurtigvoksende kultur, poppel med bøg, høj bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	109	90	306	425	792	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	11	-2	22	12	6	8
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	29	0	11	11	11
II: Hurtigvoksende kultur, poppel med eg, lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	77	252	118	260	567	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	8	18	-13	14	5	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	7	20	0	4	5
II: Hurtigvoksende kultur, douglas/sitka/grandis/rødgran, høj bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	171	296	435	535	818	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	17	12	14	10	5	8
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	29	21	16	10	13
II: Hurtigvoksende kultur, sitka/rødgran, lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	82	280	148	294	626	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	8	20	-13	15	6	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	7	20	5	8	8

Scenarie	0-10	10-20	20-30	30-40	40-100	gns 0-100
III: Naturlig tilgroning, mange frøkilder (20 år), høj bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	25	55	89	148	609	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	3	3	6	8	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	1	5	4	3
III: Naturlig tilgroning, få frøkilder (60 år), lav bonitet, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	24	48	81	114	562	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	2	2	3	3	7	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	3	2	2
III: Naturlig tilgroning, Trædække under 50 % og max 5 m høj, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	27	55	92	129	213	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	3	4	4	1	2
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	0	0
Reference I – NFI skovrejsning siden 1990 - NFAP model, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	46	118	272	366	609	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	5	7	15	9	4	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	2	10	8	6
Reference II – NFI naturlig tilgroning siden 1990 - 50 % kronedække, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	33	80	177	303	609	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	3	5	10	13	5	6
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	0	0
Reference III – Det danske skovareal – samlet ved konstant areal, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	300	308	315	323	315	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	1	1	1	1	0	1
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	8	8	8	8	8	8
Reference IV, Suserup skov, urørt skov kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	841	995	995	995	843	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	-9	15	0	0	-3	1
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	0	0
Reference V - Ophør af drift af 150 år gammel bøgeskov, kulstof i lager (t CO2 eq/ha)	425	467	509	551	599	
Ændring i lager (AG+BG+DW+FF+SOM) (t CO2 eq/ha/år)	4	4	4	4	1	1
Kulstof i høst (t CO2 eq/ha/år)	0	0	0	0	0	0

Diskussion

Etablering af skov vil erstatte anden arealanvendelse; i Danmark oftest landbrugsafgrøder eller vedvarende græsarealer. Disse arealer indgår også i Danmarks klimarapportering samtidig med at de bidrager med bl.a. fødevarer og foder produktion. Udtag af landbrugsarealer vil kunne påvirke produktion og handel med fødevarer, evt. import fra andre lande. Der vil også være arealer som uden større indflydelse på aktuel produktion vil kunne udtages af landbrugsarealet. Disse forhold er ikke analyseret i dette notat.

I skovarealet er der pt ca. 5 % hjælpearealer og ubevoksede arealer (Nord-Larsen et al. 2018). Ved etablering af større nye skovarealer, bør der afsættes arealer til hjælpearealer, som fragår det areal, hvor væksten og kulstofbindingen foregår.

Konklusion

Ved skovrejsning er der således ikke ét tal for kulstofoptaget, der vil være gældende, men kulstofoptaget vil være påvirket af følgende hovedfaktorer:

- Hvor – jordbunden og lokale vækstvilkår (nedbør, temperatur).
- Hvordan – træart og forvaltning (plantning, tilgroning, hjælpe træer).
- Hvornår – alder af skovrejsningen påvirker kulstofoptaget i den aktuelle periode.

Ny skovrejsning, som den er gennemført siden 1990, vil have en gennemsnitlig kulstofbinding på 12 t CO₂ eq/ha/år, med en spændvidde på 4-21 t CO₂ eq/ha/år afhængig af hovedfaktorerne. Det samlede skovareal har en årlig kulstofbinding på 9 t CO₂ eq/ha/år. Både kulstoflageret i skoven og mulighed for substitutionseffekter gennem høst af træ påvirkes af skovforvaltning.

Referencer

SIDE 22 AF 26

- Aude, E, Hansen, DN, Møller, PF & Riis-Nielsen, T (2002): Naturnær skovrejsning – et bæredygtigt alternativ? Danmarks Miljøundersøgelser. 47 s.- Faglig rapport fra DMU nr. 389. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>
- Bárcena, T.G., Kiær, L.P., Vesterdal, L., Stefánsdóttir, H.M., Gundersen, P., Sigurdsson, B.D., (2014b). Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: A meta-analysis. *Global Change Biology* 20, pp. 2393-2405.
- Bárcena, TG, Gundersen, P & Vesterdal, L (2014a): Afforestation effects on SOC in former cropland: Oak and spruce chronosequences resampled after 13 years. *Global Change Biology*, 20(9), pp. 2938–2952. doi: 10.1111/gcb.12608.
- Bentsen NS & Sørensen MA (2004): Etablering af løvtræ på marginale landbrugsjorder. *Skov & Landskab*. 53 pp.
- Bentsen, NS, Jørgensen, JR, Stupak, I, Jørgensen U & Taghizadeh-Toosi, A (2019). Dynamic sustainability assessment of heat and electricity production based on agricultural crop residues in Denmark. *Journal of Cleaner Production* 213: 491-507
- Bergstedt, A. 1981: Dyrkning af poppel. Statens forstlige Forsøgsvæsen. 106 s.
- Brunner, A & Klitgaard, OL (2001): Genopbygning af tyske skove efter orkanskader – Temadag i Freiburg. *Skoven Særnummer 2/2001*: 60-62.
- Brunner, A (2000a): Genopbygning af tyske skove efter orkanskader – Erfaringer fra Sydtyskland efter 1990. *Skoven 2/2000*: 90-93.
- Brunner, A (2000b): Genopbygning af tyske skove efter orkanskader – Erfaringer fra Nordtyskland. *Skoven 6-7/2000*: 285-288.
- Brunner, A (2001): Naturlig tilgroning efter stormfald. *Skovbrug, Videnblad* 3.1-6.
- Callesen, I, Stupak, I, Georgiadis, P, Johannsen, VK, Østergaard, HS & Vesterdal, L (2015): Soil carbon stock change in the forests of Denmark between 1990 and 2008. *Geoderma Regional*, bind 5, s. 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.06.003>
- De Rosa, M., M. Pizzol and J. Schmidt (2018). How methodological choices affect LCA climate impact results: the case of structural timber. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23(1): 147-158.
- Geng, A., H. Yang, J. Chen and Y. Hong (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics* 85(Part 1): 192-200.

- Graudal, L, Nielsen, UB, et al., (2013): Muligheder for Bæredygtig udvidelse af dansk produceret vedmasse 2010-2100. Available at:
<http://ign.ku.dk/formidling/publikationer/rapporter/filer-2013/Final-Skovenes-bidrag-biobaseret-oekonomi-17jan.pdf>.
- Graudal, L, Nielsen, UB, Schou, E, Thorsen, BJ, Hansen, JK, Bentsen, NS og Johannsen, VK (2013b): Dansk skovbrugs mulige bidrag til øget træproduktion og imødegåelse af klimaforandringer. Perspektiver for skovenes bidrag til grøn omstilling mod en biobaseret økonomi, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet, Frederiksberg. 16 s. ill.
<https://ign.ku.dk/publikationer/publikationer/haeften/filer/DkSkovBidrag2014.pdf>
- Gundersen, P, Matthesen, P, Buttenschøn, RM, Jensen, FS, Riis-Nielsen, T, Callesen, I, Ramhøj, G (1999): Skovrejsning og vedvarende græsarealer - Drastrup projektet.
- Jansen, J.J., J. Sevenster og P.J. Faber (1996). OPBRENGST TABELLEN voor belangrijke boomsoorten in Nederland. IBN rapport nr. 221 tevens verschenen als: Hinkeloord Reports No. 17.
- Johannsen VK (2018): Hvor meget tørstof og kulstof kan der bindes ved skovrejsning? Sagsnotat 2018. 3 s., aug. 16, 2018. https://static-curis.ku.dk/portal/files/203807749/Sagsnotat_skovrejsning20180816.pdf
- Johannsen VK, Bentsen NS, Nord-Larsen T, Vesterdal L, Schmidt IK (2019): Klimaeffekter af urørt skov og anden biodiversitetsskov: Sagsnotat. 2019. 18 s. https://static-curis.ku.dk/portal/files/215230082/Sagsnotat_klima_NP_20190208.pdf
- Johannsen VK, Nord-Larsen T, Bentsen NS, Vesterdal L (2018): Hvorfor tallene i forskellige virkemiddel opgørelser er så forskellige fra hinanden? Sagsnotat. 2018. 10 s., sep. 13, 2018. https://static-curis.ku.dk/portal/files/203807657/Sagsnotat_skovrejsning_sammenligning_20180913_LBST.pdf
- Johannsen, VK, Nielsen, K, Fritzbøger, B, Buchwald, E, Serup, H, Møller, PF, Schmidt, IK; Kepfer Rojas, S; Nord-Larsen, T Larsen, JB Jørgensen, BB Vesterdal, L, Rune, F, Halse, AY, Riis-Nielsen, T, Arndal, M F (2015). Opgørelsesmetoder og udvikling i dødt ved. (2. udg.) Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. IGN Rapport
- Johannsen, VK, Nord-Larsen, T, Bentsen, NS and Vesterdal, L (2019): Danish National Forest Accounting Plan 2021-2030. IGN report. Department of Geosciences and Resource Management, University of Copenhagen, Frederiksberg. 79 p. ill. https://static-curis.ku.dk/portal/files/213509290/DanishNationalForestAccountingPlan_DNFAP_web_2.pdf

- Johannsen, VK, Nord-Larsen, T, Vesterdal, L, Suadicani, K, & Callesen, I (2017): Identifying potential uncertainties associated with forecasting and monitoring carbon sequestration in forests and harvested wood products. Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen.
- Koning, JHC de & Hart, M (2018): Forest recovery after windthrow – an assessment of three treatments in two experimental sites in Southern Denmark. Thesis at Master of Science (MSc) in Forest and Nature Management. 283 pp.
- Madsen, K. and S. N. Bentsen (2018). "Carbon Debt Payback Time for a Biomass Fired CHP Plant—A Case Study from Northern Europe." *Energies* 11(4).
- Nielsen, AT, Nord-Larsen, T, Stupak, I & Raulund-Rasmussen, K 2015, 'Allometric Biomass, Biomass Expansion Factor and Wood Density Models for the OP42 Hybrid Poplar in Southern Scandinavia' *Bioenergy Research*, bind 8, nr. 3, s. 1332-1343. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9592-3>
- Nielsen, UB, Madsen, P, Hansen, JK, Nord-Larsen, T & Nielsen, AT (2014): Production potential of 36 poplar clones grown at medium length rotation in Denmark. *Biomass & Bioenergy*, bind 64, s. 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.030>
- Nilsson KN & Aller A (2019): Kulstofbinding i jordbunden ved rejsning af bøgeskov på landbrugsjord i Vestskoven. BSc projekt geografi og geoinformatik. 51 pp.
- Nord-Larsen, T & Nielsen, AT (2015): 'Biomass, stem basic density and expansion factor functions for five exotic conifers grown in Denmark' *Scandinavian Journal of Forest Research*, bind 30, nr. 2, s. 135-153. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.986519>
- Nord-Larsen, T, & Johannsen, VK (2016): Danish National Forest Inventory: Design and calculations. Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen. IGN Report
- Nord-Larsen, T, Johannsen, VK, Riis-Nielsen, T, Thomsen, IM, Bentsen, NS, Gundersen, P, & Jørgensen, BB (2018): Skove og plantager 2017: Forest statistics 2017. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.
- Nord-Larsen, T, Meilby, H & Skovsgaard, JP (2009) Sitespecific height growth models for six common tree species in Denmark, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24:3, 194-204, DOI: 10.1080/02827580902795036
- Nord-Larsen, T, Meilby, H & Skovsgaard, JP (2017): 'Simultaneous estimation of biomass models for 13 tree species: effects of compatible additivity requirements' *Canadian Journal of Forest Research*, bind 47, nr. 6, s. 765-776. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0430>

- Nord-Larsen, T, Meilby, H, Johannsen, VK & Skovsgaard, JP (2008):
Development of Vidar a growth model for Danish forest tree species. Forest
& Landscape. 76 pp.
- Nord-Larsen, T, Vesterdal, L, Bentsen, NS, Larsen, JB (2019): Ecosystem carbon
stocks and their temporal resilience in a semi-natural beech-dominated
forest. Forest Ecology and Management. 447: 67-76.
[nonhttps://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.038](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.038)
- Olrik DC, Westergaard LH, Jensen JS og Norrie JE (2002): Design og plantevalg i
bredere løvtræslæhegn. Park- og Landskabsserien nr. 35-2002, Skov &
Landskab (FSL), Hørsholm, 2002. 58 s. ill.
- Pedersen LB, Buttenschøn RM og Jensen TS (2001): Græsning på ekstensivt
drevne naturarealer – Effekter på stofkredsløb og naturindhold. Park og
Landskabsserien nr. 34, Skov & Landskab, Hørsholm, 2001. 184 s. ill.
- Pedersen, NK (2019): Data vedr. naturlig tilgroning – pers.medd.
- Rahman, MM, Bárcena, TG & Vesterdal, L (2017): Tree species and time since
afforestation drive soil C and N mineralization on former cropland.
Geoderma, bind 305, s. 153–161.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.002>
- Sathre, R. and J. O'Connor (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement
factors of wood product substitution. Environmental Science & Policy 13(2):
104-114
- Schou, E, Johannsen, VK, Nord-Larsen, T, og Jørgensen BB (2014): Konkrete
opgørelser og erfaringer fra 20 års skovrejsning – med fokus på lokalitet,
træart og vækst. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns
Universitet, Frederiksberg. 46 s. ill. [https://static-
curis.ku.dk/portal/files/131692423/Skovrejsning.pdf](https://static-curis.ku.dk/portal/files/131692423/Skovrejsning.pdf)
- Skovsgaard, JP & Nord-Larsen, T 2012, 'Biomass, basic density and biomass
expansion factor functions for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in
Denmark' European Journal of Forest Research, bind 131, nr. 4, s. 1035-
1053. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0575-4>
- Smyth, C., G. Rampley, T. C. Lemprière, O. Schwab and W. A. Kurz (2017).
Estimating product and energy substitution benefits in national-scale
mitigation analyses for Canada. GCB Bioenergy 9(6): 1071-1084.
- Thorup Lottrup, JS (2019): The forgotten forest. What characterises the forgotten
forests and how are they different from the rest of the forest. MSc thesis
Forest and Nature Management. 123 pp.
- Vesterdal, L, Ritter, E. and Gundersen, P 2002. Change in soil organic carbon
following afforestation of former arable land. Forest Ecology and
Management 169, pp 141-151.
- VIDAR - Software - <http://ign.ku.dk/formidling/software/vidar/>

Westergaard L, Norrie JE og Jensen JS (2001): Anden generation løvtrælæhegn – en analyse af plantevalget i 20 jyske forsøgslæhegn etableret i 1980'erne. Park- og Landskabsserien nr. 32, Skov & Landskab (FSL), Hørsholm, 2001. 84 s. ill.

SIDE 26 AF 26

Østergaard MZ (2019): CO₂-binding i træbiomasse ved rejsning af ny skov. BSc projekt Naturressourcer. 70 pp.